

УДК 535.42

Специфика компьютерного моделирования волноводных дифракционных элементов в AR дисплеях

Путилин Николай Андреевич^{1, 2(*)}

nick.putilin.01@mail.ru
SPIN-код: 6753-7109

Смык Федор Сергеевич^{1, 2}

f.smyk@list.ru

Откупман Дмитрий Григорьевич¹

odvk@ya.ru
SPIN-код: 2889-5699

Киселев Максим Дмитриевич¹

mkiselev-24@edu.miigaik.ru

¹ Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия

² Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрены особенности подходов к построению компьютерных моделей волноводных дифракционных перископов, работающих в устройствах дополненной реальности. Анализ основывался на тех результатах, которые были получены авторами в ходе разработки оригинальных компьютерных программ. В анализе подчеркиваются те моменты, которые могут приводить к расхождениям между расчетными и экспериментальными результатами. Рассмотрено построение и структура программы для непоследовательной трассировки лучей с древовидной структурой и системой обратной фильтрации лучей. Продемонстрированы достоинства указанного подхода и возможные пути решения возникающих сложностей.

Ключевые слова: волноводные дифракционные элементы, непоследовательная трассировка лучей, дисплеи дополненной реальности

Specifics of computer modeling of waveguide diffractive elements in AR displays

Putilin Nikolay Andreevich^{1, 2(*)}

nick.putilin.01@mail.ru
SPIN-code: 6753-7109

Smyk Fedor Sergeevich^{1, 2}

f.smyk@list.ru

Otkupman Dmitry Grigorievich¹

odvk@ya.ru
SPIN-code: 2889-5699

Kiselev Maksim Dmitrievitch¹

mkiselev-24@edu.miigaik.ru

¹ Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

² Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. This article examines the specifics of approaches to constructing computer models of waveguide diffraction periscopes used in augmented reality devices. The analysis is based on the results obtained by the authors during the development of original computer programs. The analysis highlights potential discrepancies between calculated and experimental results. The design and structure of a program for non-sequential ray tracing with a tree-like structure and a ray inverse filtering system are discussed. The advantages of this approach and possible solutions to the emerging challenges are demonstrated.

Keywords: waveguide diffractive elements, non-sequential ray tracing, augmented reality displays

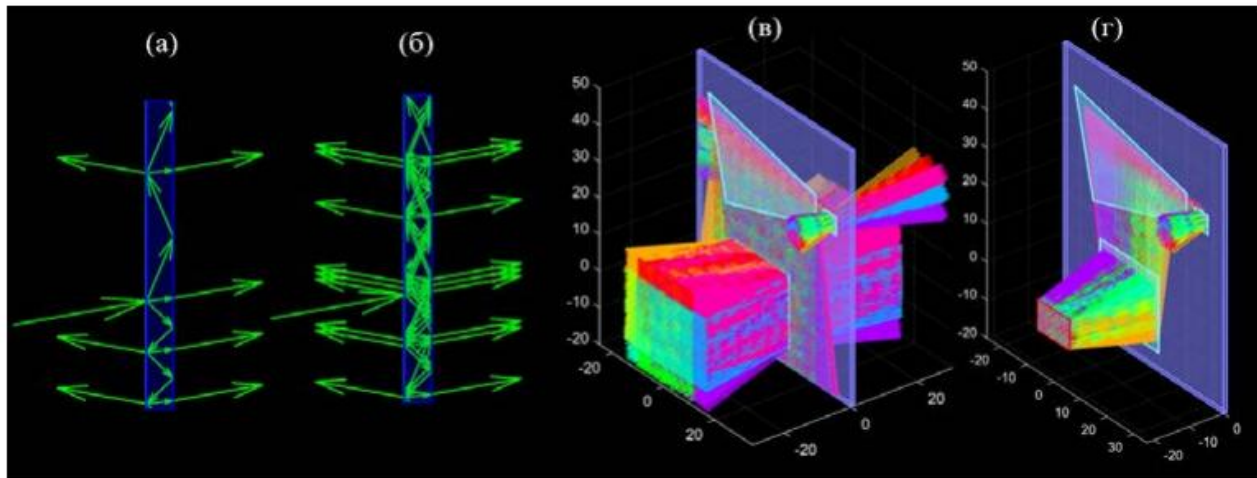
Введение. Волноводные дифракционные элементы нашли в последнее время широкое применение в дисплеях дополненной реальности в качестве устройства совмещения световых пучков [1, 2]. В отличие от работ 1980-х годов, нынешняя волна интереса к подобного рода элементам вывела их на уровень коммерческого продукта. В связи с этим кратно возрос интерес и к компьютерному моделированию подобных компонентов. Так, в 2022 году фирма Ansys интегрировала в свой широко известный продукт Zemax OpticStudio специальный тип компонента, описывающий волноводные дифракционные перископы. Публикации на сайте производителя на эту тему [3], а также множество статей, в которых данное программное обеспечение используется для моделирования указанных элементов [4, 5], свидетельствуют о достаточно большом интересе со стороны пользователей к вопросу моделирования волноводных дифракционных элементов. Профессиональные разработчики используют и другие образцы специализированного программного обеспечения.

Работы отечественных научно-исследовательских групп начались задолго до роста публичного интереса к указанной тематике [6]. Но так как в коммерческих программах необходимый функционал по большей части отсутствовал, то возникла потребность в создании собственных компьютерных программ. Подобные работы были начаты нами несколько лет назад, и в связи с этим особый интерес может представлять анализ полученных за этот период результатов.

Материалы и методы. Основными данными, анализируемыми в работе, являются результаты трассировки лучей и их сопоставление с экспериментальными данными. Расчет хода лучей выполнялся параллельно путем выполнения соответствующих операций с матрицами, описывающими координаты и волновые вектора лучей. Для этих целей использовались встроенные библиотеки линейной алгебры Matlab и Octave, а позже, при создании оконного приложения, — возможности языка Fortran.

Непоследовательная трассировка лучей осуществлялась согласно следующему: циклу: вначале находилось пересечение луча с ближайшей оптической поверхностью (с учетом ее границ). Далее для указанного диапазона порядков дифракции рассматривалось наличие порядков дифракции для каждого луча. Весьма часто используют подход, в рамках которого далее трассируется только один луч, выбранный согласно условной «вероятности дифракции» в тот или иной порядок. В данной работе трассировались все возможные лучи из заданного диапазона порядков дифракции (соответствующие иллюстрации приведены на рис. а, б). Связь между лучами было возможно восстановить благодаря нумерации лучей, в которой каждый луч сохранял номер, данный при предыдущей итерации трассировки, и получал новый номер в общем перечне новых лучей. Это обеспечивало возможность

реализовать (несмотря на сложную «древовидную» структуру трассировки) обратную фильтрацию (рис. 6, 2).



Примеры трассировки лучей через волноводные дифракционные перископы в разработанной программе: *а* — трассировка лучей через однокоординатный волновод с учетом ± 1 -ых порядков дифракции; *б* — трассировка лучей с учетом всех возможных порядков дифракции и френелевских отражений в волноводе; *в* — трассировка лучей в схеме типа Hololens-1, *г* — обратная фильтрация лучей, попавших в требуемую область выходного зрачка

Следующей особенностью предложенной модели трассировки являлось то, что в ней для класса лучей делалось возможным передавать вслед за лучом любую необходимую информацию в виде скалярных величин или векторов. Это позволяет далее передавать данные не только об интенсивности лучей, но и о других физических параметрах (поляризации, длине оптического пути, номере поверхности, на которую произошло падение луча и т. д.).

Результаты. На первом этапе программа для трассировки лучей была реализована на языке Matlab (с использованием интерпретатора Octave). Полученные результаты легли в основу ряда работ, ключевой задачей которых было добиться соответствия между результатами моделирования и экспериментальными данными. Примечательно, что в большинстве выполненных исследований при трассировке не рассчитывалась дифракционная эффективность и, соответственно, не рассчитывалась интенсивность лучей. Тем не менее, по характеру получаемой картины мультиплицированных в волноводном перископе лучей (которая особенно заметна благодаря «древовидной» трассировке) удалось выявить ряд весьма существенных расхождений с экспериментом. В первую очередь, речь шла о необходимости учитывать 2-е порядки дифракции в волноводе [7], а также дифракцию на «муаровых» дифракционных решетках, возникающих при наложении двух интерференционных картин. Реализация обратной фильтрации сделала возможным определять, какие из лучей в волноводе оказались полезными при формировании выходного зрачка, что весьма удобно при определении требуемых размеров дифракци-

онных элементов. В качестве иллюстрации на рис. 2 показано определение размеров поворотной дифракционной решетки в схеме типа Hololens-1. Однако указанный подход обнаружил и ряд недостатков. Так, при подобной трассировке экспоненциально растет количество лучей, что затрудняет моделирование работы волноводов при большом отношении их длины к толщине. Особенно большой проблемой это становится при учете френелевских отражений (см. рис. б).

Обсуждение. Полученные результаты дали возможность выявить ряд характерных режимов дифракции (волноводная дифракция 2-ого порядка), а также были использованы при расчетах периодов и размеров дифракционных элементов в процессе их разработки. Дальнейшее развитие программы требовало интеграции расчета интенсивности лучей при их распространении. Это было реализовано при моделировании работы интерферометров на основе волноводных дифракционных перископов [8] и дало положительный результат. Учет интенсивности дает возможность ввести пороговый фильтр по уровню интенсивности и тем самым ограничить экспоненциальный рост количества трассируемых лучей.

Начата работа по интеграции в программу методик расчета дифракционной эффективности на основе RCWA методов и метода связанных волн Когельника.

Заключение. Задача создания достоверной компьютерной модели, описывающей работу волноводного дифракционного перископа, является комплексной и требует решения не только вопросов расчета дифракционной эффективности, но и отработки и проверки алгоритмов трассировки лучей. Степень допустимых приближений необходимо постоянно проверять путем сопоставления результатов моделирования с экспериментом. Непоследовательная трассировка с «древовидной» структурой и системой передачи данных о лучах дает ряд важных преимуществ при исследовании работы волноводных дифракционных элементов.

Список источников

- [1] Ding Y., Yang Q., Li Y. et al. Waveguide-based augmented reality displays: perspectives and challenges. *eLight*, 2023, vol. 3, no. 1, pp. 24–58. <https://doi.org/10.1186/s43593-023-00057-z>
- [2] Kress B.C., Pace M. Holographic optics in planar optical systems for next generation small form factor mixed reality headsets. *Light: Advanced Manufacturing*, 2022, vol. 3, no. 4, pp. 771–801. <https://doi.org/10.37188/lam.2022.042>
- [3] Ansys, OpticStudio: “How to simulate exit pupil expander EPE with diffractive optics for augmented reality AR system in OpticStudio”. URL: <https://optics.ansys.com/hc/en-us/articles/42661745411859-How-to-simulate-exit-pupil-expander-EPE-with-diffractive-optics-for-augmented-reality-AR-system-in-OpticStudio-part-1> (accessed 15.01.2026).
- [4] Yeh C.H., Tang J.Y. Optimizing AR waveguide structures to enhance imaging quality. *Optics Continuum*, 2025, vol. 4, no. 3, pp. 488–511. <https://doi.org/10.1364/OPTCON.544779>
- [5] Dai G. et al. Inverse design and uniformity optimization of diffractive waveguides for AR-HUD using neural networks. *Applied Optics*, 2025, vol. 64, no. 13, pp. 3536–3544. <https://doi.org/10.1364/AO.555741>

- [6] Putilin A., Gustomiasov I. Application of holographic elements in displays and planar illuminators. XV International Symposium on Advanced Display Technologies, SPIE, 2007, vol. 6637, pp. 147–153. <https://doi.org/10.1117/12.742913>
- [7] Путилин Н.А., Дубынин С.Е., Путилин А.Н. и др. Волноводные голографические перископы с двухкоординатной мультипликацией выходного зрачка на одномерной дифракционной решетке. *Оптический журнал*, 2025, т. 92, № 7, с. 35–51. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2025-92-07-35-51>
- [8] Путилин Н.А., Соломатин В.А. и др. Возможности применения волноводных голограмм в схемах контроля качества оптических элементов. *Оптический журнал*, 2026, т. 93, № 3, с. 40–52. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2026-93-03-40-52>

